



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

OVĚŘENÍ VYUŽITÍ AGROPELET PRO VYTÁPĚNÍ

VERIFICATION OF THE USE OF AGRO PELLETS FOR HEATING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Věra Muzikářová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Věra Muzikářová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Ověření využití agropelet pro vytápění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V poslední době je biomasa velmi oblíbeným palivem pro domovní vytápění. Vedle klasického využití dřevní biomasy se stále častěji využívá pelet z různých odpadů zemědělské výroby, které ale mají vlastnosti od dřevní biomasy odlišné. Náplní práce je pojmenovat tyto odlišnosti a provést sérii experimentů, při kterých bude sledováno rozdílné chování agromateriálů při spalování.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše dostupných druhů biomasy
- vlastnosti biomasy jako paliva s důrazem na agromateriály
- porovnání účinností a emisní třídy kotle pro různé agropelety

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

JANDAČKA, Jozef. Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. 1. Žilina: BALPO, 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.

MALATĚÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S

.....
doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá agropeletami a jejich spalováním z hlediska emisí a účinnosti. Je složena ze dvou částí. První část je teoretická, kde je uvedena rešerše dostupných druhů biomasy, výroba agropelet a princip spalování. Druhá část práce je zaměřena na experimentální porovnání účinností a emisní třídy kotle pro různé agropelety.

Klíčová slova

Agropelety, spalování, emise, tuhé znečišťující látky, účinnost

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with agropellets and their combustion in terms of emissions and efficiency. It consists of two parts. The first part is theoretical, where the search of available types of biomass, production of agropellets and combustion principle is presented. The second part of the thesis is focused on experimental comparison of efficiency and emission class of boiler for various agropellets.

Key words

Agropellets, combustion, emissions, pollutants, efficiency

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MUZIKÁŘOVÁ, Věra. *Ověření využití agropelet pro vytápění* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116712>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Ověření využití agropelet pro vytápění** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Markovi Balášovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Otakarovi Štelcovi a Ing. Haně Lisé, Ph.D. za pomoc při experimentálním měření.

Podpis

OBSAH

ÚVOD.....	15
1 Biomasa	16
1.1 Charakteristické vlastnosti biomasy	16
1.1.1 Vlhkost	16
1.1.2 Výhřevnost	16
1.1.3 Chemické složení hořlaviny	17
1.1.4 Obsah popelovin.....	18
1.2 Rozdělení biomasy.....	18
1.3 Dentromasa – dřevní biomasa.....	19
1.4 Výroba elektřiny a tepla z biomasy v ČR.....	20
2 Agropelety	22
2.1 Výroba	22
2.2 Fytomasa pro výrobu agropelet	24
2.2.1 Řepka olejná.....	24
2.2.2 Pšenice.....	24
2.2.3 Lnička setá.....	24
2.2.4 Konopí seté.....	25
2.2.5 Bojínkové seno	25
2.2.6 Triticale	25
2.2.7 Krmný šťovík	26
2.2.8 Kukuřice	26
3 Spalování	27
3.1 Emise	27
3.1.1 Oxidy uhlíku.....	27
3.1.2 Oxidy dusíku	28
3.1.3 Tuhé znečišťující látky (TZL).....	28
3.2 Norma ČSN EN 303-5 (Emisní limity)	29
3.3 Směrnice o požadavcích na ekodesing	29
3.4 Účinnost kotle	31
3.4.1 Přímá metoda.....	31
3.4.2 Nepřímá metoda	31
4 Experimentální část	34
4.1 Měření plynných emisí	35
4.1.1 Výsledky plynných emisí	35
4.2 Měření TZL.....	37
4.2.1 Výsledky TZL	38
4.3 Účinnost	39

ZÁVĚR	44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
SEZNAM OBRÁZKŮ	49
SEZNAM TABULEK.....	50

ÚVOD

Již od počátků využívá lidstvo, pro získání tepelné, energie spalování různých materiálů. Nejprve se využívala hlavně dřevní biomasa. Dále se začaly objevovat jiné a lepší zdroje energie, které měly větší výhřevnost. Jednalo se převážně o uhlí, zemní plyn a ropu. Tato paliva se však řadí mezi neobnovitelná. Při jejich těžbě dochází k velkému zásahu do životního prostředí a spalování těchto paliv není také příliš ekologické. Zásoby těchto paliv jsou ale omezené, proto je nyní snaha využívat obnovitelné zdroje energie.

V poslední době je biomasa velmi oblíbeným palivem pro domovní vytápění. Díky tomu, že ji lze řadit mezi obnovitelné zdroje energie, je velice oblíbená v energetice.

Biomasu používáme k topení nejčastěji ve formě kusového dřeva, což je velice levné a dostupné palivo. Kvůli lepší regulaci výkonu a menšímu zařízení pro spalování se dřevo začalo využívat ve formě pelet. Pelety mají malý obsah vlhkosti, a tudíž dobrou výhřevnost.

Vedle klasického využití dřevní biomasy se stále častěji pro výrobu pelet začínají používat agromateriály, které ale mají od dřevní biomasy vlastnosti odlišné.

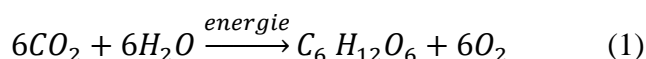
Úkolem této práce je přehled biomasy s důrazem na agromateriály a její spalování. V první části práce se budeme zabývat dostupnými druhy biomasy, emisemi a účinnostmi při jejím spalování.

Ve druhé části bude prakticky provedena série experimentů, při kterých je sledováno rozdílné chování agromateriálů při spalování s různými koncentracemi kyslíku. Výsledné hodnoty jsou porovnány s normou ČSN EN 303-5 a se Směrnicí o požadavcích na ekodesing.

1 Biomasa

Biomasa je materiál organického původu vhodný na energetické využití, což nejvíce přispívá k omezení emisí oxidu uhličitého CO₂ do atmosféry a patří mezi zdroje obnovitelné energie. Ekologické a zároveň co nejefektivnější využívání biomasy má minimální vliv na životní prostředí. [1]

Vznik biomasy je vždy spojen s fotosyntézou, což je endotermická reakce, kde se využívá zachycování slunečního záření viz rovnice (1). [2]



1.1 Charakteristické vlastnosti biomasy

Nejpodstatnější vlastnosti biomasy jsou [3][4]:

- Vlhkost
- Výhřevnost
- Chemické složení hořlaviny
- Obsah popelovin

1.1.1 Vlhkost

Vlhkost nebo také obsah vody v biomase je nežádoucí, protože snižuje výhřevnost paliva a způsobuje řadu potíží při dopravě paliva (voda v zimě zamrzá a způsobuje potíže při vyložení vagónů) i při samostatném spalování (paliva s velkým obsahem vody se hůře zapalují). Voda při spalování pohlcuje uvolněné teplo a snižuje spalovací teplotu, tudíž vlhkost paliva určuje kvalitu spalovacího procesu. Při spalování voda odchází se spalinami ve formě vodní páry, čím pádem se zvětší objem spalin. Když teplota spalin klesne pod hranici rosného bodu, urychlí se koroze kotle ze strany spalin. Snahou je získat palivo s co nejmenším obsahem vody, což závisí na tom, kde je biomasa získávána. Biomasa z dřevozpracujícího průmyslu mívá obvykle větší vlhkost než biomasa ze zemědělství. [3][4]

1.1.2 Výhřevnost

Výhřevnost se nedá změřit, proto je určena ze spalného tepla pomocí výpočtu (3).

Spalného tepla je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C. Voda ve spalinách kondenzuje – je v kapalně fázi. Jeho hodnota se určuje laboratorně v kalorimetru a to tak, že je vytvořen homogenní vzorek, který je spálen v kyslíkové atmosféře o tlaku asi 3 MPa v kalorimetrické bombě. Ze změřeného rozdílu teplot ve vodní lázni je vypočteno spalné teplo pomocí rovnice (2). [3]

$$Q_s = \frac{V \cdot \Delta T}{m_{pal}} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2)$$

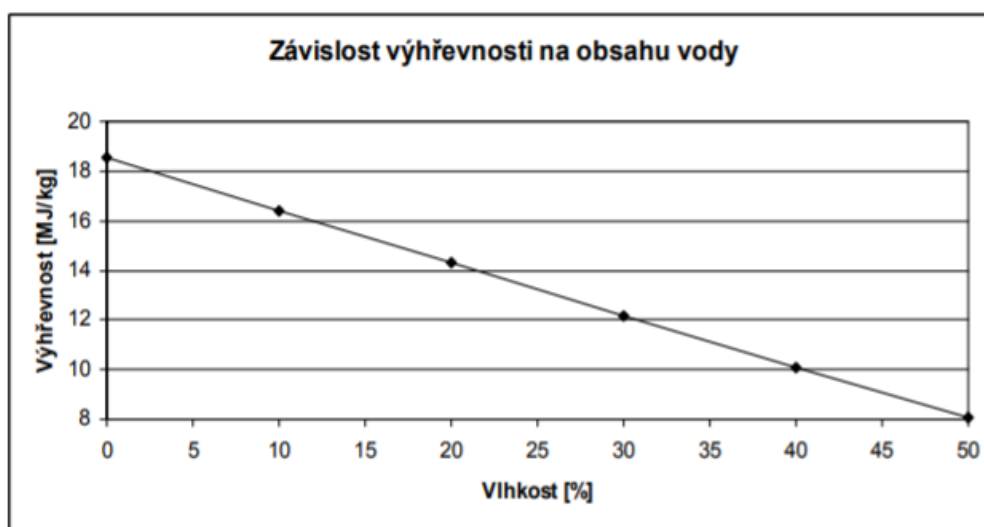
kde	V	[kJ/K]	vodní hodnota kalorimetru
	m_{pal}	[kg]	hmotnost paliva
	ΔT	[K]	rozdíl teplot ve vodní lázni

Výhřevnost neboli energetický potenciál paliva Q_i^r je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C. Voda ve spalinách zůstane v plynné fázi. [3]

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W + 8,94 \cdot H_2) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3)$$

kde	r	[kJ/kg]	výparné (kondenzační teplo vody ($r = 2454 \text{ kJ.kg}^{-1}$))
	W	[-]	obsah vody v palivu
	H_2	[-]	obsah vodíku v surovém palivu

Výhřevnost je silně závislá na vlhkosti paliva. Jak lze vidět na obr. 1.1, čím větší má palivo vlhkost, tím je výhřevnost menší. Pro spalování by měla být vlhkost biomasy menší než 50 %.



Obr. 1.1 Závislost výhřevnosti biomasy na obsahu vody [4]

1.1.3 Chemické složení hořlaviny

Hořlavina je část paliva, která je nositelem uvolněného tepla při spalování. Hořlavina u biomasy je složena z pěti prvků (uhlík, vodík, síra, dusík a kyslík). Výhodou tohoto paliva je, že obsahuje vysoký podíl prchavé hořlaviny, která se uvolňuje při začátku spalování a podstatně napomáhá vzněcování paliva v ohništi [3].

Velkou výhodou biomasy je, že obsahuje minimální množství síry, tudíž během spalování nedochází ke vzniku škodlivých sloučenin, dále je nižší teplota rosného bodu a tím i nižší teplota spalin odcházející do komína [4].

V tabulce 1.1 můžeme vidět orientační procentuální hodnoty podstatných chemických prvků v hořlavině.

Tab. 1.1 Chemické složení hořlaviny [3,4]

Složka	Dřevo			Sláma	
[%]	Jehličnaté	Listnaté	kůra	obilná	řepková
C ^{daf}	51,0	50,0	51,4	40,7	46,0
H ^{daf}	6,2	6,2	6,1	4,9	5,0
O ^{daf}	42,2	43,3	42,2	35,8	40,0
N ^{daf}	0,6	0,6	0,3	0,51	
S ^{daf}	0,02	0,02	0,05	0,09	0,2
A ^r	1,0	1,0	2,3	5,8	6,0

1.1.4 Obsah popelovin

Popelovinu tvoří minerální látky (křemičitan, uhličitan, síran, ...), které jsou obsaženy v tuhém palivu před jeho spálením [3]. Při spalování se popelovina teplem rozkládá v oxidační atmosféře a těkavé složky přecházejí do spalín. Po spálení vznikne tuhý zbytek, který se nazývá popel a je stejně nežádoucí jako voda v palivu z hlediska výhřevnosti i z hlediska chování paliva [4]. Pro stavbu a provoz kotle je důležité znát charakteristické teploty popele, respektive jeho teplotu tavení. Když bude teplota popele nižší než teplota plamene při hoření, bude docházet k zalepování roštu ohniště. Palivo tak dokonale neprohoří, čímž se sníží účinnost kotle a vzroste obsah škodlivých látek ve spalínách [3].

Obsah popelovin u biomasy je oproti pevných fosilních paliv velice malý. V tabulce 1.1 je možno vidět procentuální obsah popeloviny v sušině u různých druhů biomasy a jak si lze všimnout, tak obsah popeloviny je větší u agromateriálů než u dřevin.

1.2 Rozdělení biomasy

Z hlediska legislativy se biomasa dělí podle původu vzniku do tří skupin [3][5]:

- a. Rostlinná
 - Fitomasa – biomasa, která roste na poli (kukuřice pro bioplynové stanice, rychlerostoucí dřeviny, energetické byliny, ...)
 - Dentromasa – lesní porosty, pro energetiku se nejvíce využívají zbytky po lesní těžbě. Do této skupiny patří i zbytky při produkci potravin a krmiv, kde je dominantním zástupcem obilná nebo řepková sláma.
- b. Živočišná
- c. Komunální – skupina bioodpadů a biologicky rozložitelných zbytků, kaly, organický komunální odpad.

Pro energetické účely dělíme biomasu podle způsobu získávání [3]:

- a. Cíleně pěstovaná biomasa – energetické (rychlerostoucí) dřeviny a rostliny bylinného charakteru
- b. Odpadní biomasa
 - Lesní odpady (dentromasa) – stromová hmota, která se po těžbě dřeva nevyužije (pařezy, větve, šišky, kůra)
 - Rostlinné odpady – sláma, seno, zbytky po likvidaci křovin, odpady po údržbě sadů, zeleně a travnatých ploch
 - Odpady ze živočišné výroby – hnůj, kejda, zbytky krmiv
 - Komunální organické odpady – kaly

Důležitým sledovaným parametrem u biomasy je vlhkost, protože její obsah velice kolísá. Tudíž pokud u biomasy určujeme složení, výhřevnost nebo jiné vlastnosti, musíme je vždy vztáhnout na vlhkost paliva. [3]

Dělení biomasy podle obsahu vody [6]

- a. Suchá – dřevo, dřevní odpady, sláma a další zemědělské rostliny či zbytky
 - lze ji spalovat přímo
- b. Mokrá – tekuté i pevné exkrementy hospodářských zvířat
 - nelze ji spalovat přímo, používá se pro výrobu bioplynu
- c. Speciální – olejnin, škrobové a cukernaté plodiny
 - Používá se k získávání energetických látek (bionafta, líh)

1.3 Dentromasa – dřevní biomasa

Hlavním zdrojem dentromasy je lesní hospodářství. Dřevo je jedním z nejdůležitějších paliv, které je nám lehce dostupné. Pro energetické účely se používá vytěžené dřevo, které není vhodné pro použití v dřevozpracujícím průmyslu. Dále se používá odpad, který vzniká při zpracování dřeva nebo po těžbě, což jsou například piliny, kůra, větve stromů atd. Spalovat se můžou přímo kusy dřeva, brikety nebo pelety. Čím víc je lesní biomasa upravená, tím nižší má vlhkost a větší výhřevnost. [7]

Biomasa cíleně pěstovaná

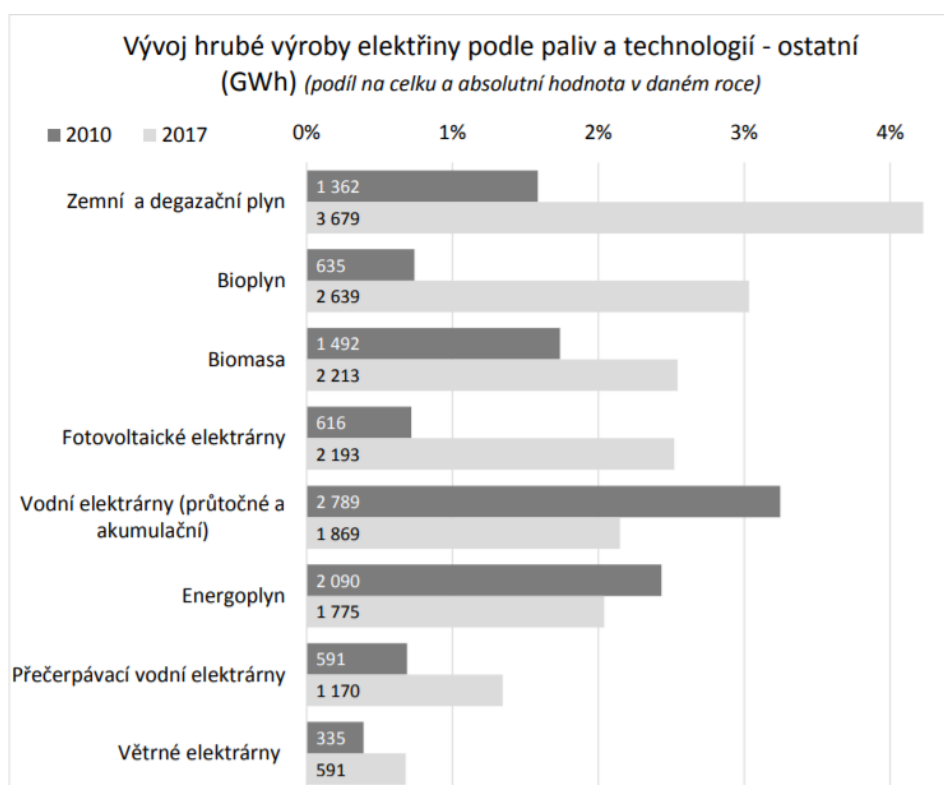
Do této skupiny řadíme rychlerostoucí dřeviny. Tento zdroj je velice ekonomicky vhodný. Dřeviny jsou vysázeny na plantážích, které plní účel využití zaplnění přebytečné zemědělské půdy. Těmto rostlinám se nejlépe daří na místech s dobrým obsahem vody a živin. Nejčastěji pěstované dřeviny jsou topoly, vrby, břízy, olše...[8]

1.4 Výroba elektřiny a tepla z biomasy v ČR

Výroba elektřiny a tepla z biomasy v České republice stále roste. Podle statistiky Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO) bylo v roce 2017 vyrobeno z biomasy 2213 GWh elektřiny, což je zhruba 2,5 % z celkové hrubé výroby elektřiny v ČR. 1133 GWh, což je zhruba polovina, bylo vyrobeno ze štěpky a dalších dřevních odpadů, 704 GWh bylo vyrobeno z celulóзовých výluhů a 96 GWh bylo vyrobeno z rostlinných materiálů. Zbytek byl vyroben z pelet, briket a kapalných biopaliv. Na obrázku 1.2 můžeme vidět, že v roce 2010 výroba elektřiny z biomasy byla zhruba 1,7 % z celkové hrubé výroby elektřiny. [9]

Tab. 1.2 Hrubá výroba elektřiny z biomasy v ČR [9]

Rok	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Pevná biomasa [GWh]	1 492	1 686	1 817	1 683	1 992	2 092	2 067	2 213
Celkem [GWh]	85 903	87 477	87 418	86 913	86 148	83 892	83 310	87 049

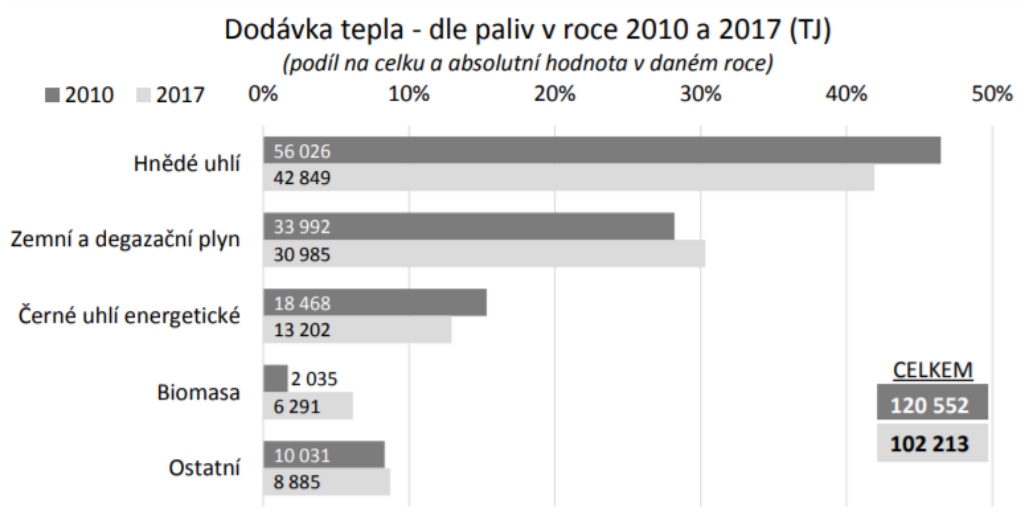


Obr. 1.2 Vývoj hrubé výroby elektřiny [9]

Podle statistik MPO bylo v roce 2017 z biomasy dodáno 6 291 TJ tepla, což je zhruba 6 % z celkové dodávky tepla. 4424 TJ, což jsou zhruba 2/3, bylo vyrobeno ze štěpky a dalších dřevních odpadů, 713 TJ bylo vyrobeno z celulózových výluhů a 395 TJ bylo vyrobeno z rostlinných materiálů. Zbytek byl vyroben z pelet, briket a kapalných biopaliv. Pro srovnání v roce 2010 teplo z biomasy tvořilo 1,7 % z celkové dodávky tepla. [9]

Tab. 1.3 Dodávka tepla z biomasy v ČR [9]

rok	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Prodané teplo [TJ]	2 035	2 517	2 431	3 936	4 629	5 474	5 778	6 291
Celkem prodané teplo [TJ]	120 550	108 785	110 461	110 988	97 124	99 200	104 989	102 213



Obr. 1.3 Vývoj dodávky tepla [9]

2 Agropelety

Agropelety jsou ekologicky ušlechtilé palivo, které se vyrábí především z rostlinné biomasy. Jedná se například o zbytky sena, slámy, energetické rostliny, odpady vzniklé při zpracování obilnin, luštěnin a olejnin [10]. Používají se v podobě slisovaných válečků a spalují se v automatických kotlích nebo kamnech na pelety. Proces výroby pelet se nazývá peletizace. Díky slisování obsahují minimální množství vody, proto hoří velmi dlouho a nevzniká téměř žádný kouř. Zbylé malé množství popele se dá využít jako přírodní hnojivo [11].

Mechanicky lisované pelety neobsahují žádná chemická pojiva nebo jiné přídavné směsi a během jejich spalování téměř nedochází k uvolňování škodlivin [12].

2.1 Výroba

Nejideálnější vlhkost vstupního materiálu je 10–12 %. Vlhčí materiál (asi do 18 %) sníží dlouhodobou kvalitu. Zprvu je sice pevnější, ale brzy se pelety začnou drobit. Pro materiál hodně vlhký (asi 30 %) se používá opakovaná peletizace, kde se materiál tak dlouho peletizuje, vysušuje a třídí, až se podaří vyrobit pelety o výstupní vlhkosti 14 %.

Velikost částic materiálu určeného k peletování by neměla přesahovat 1/5 průměru finální pelety. Čím jemnější je struktura materiálu, tím je výsledná peleta pevnější.

Než začneme materiál peletovat, musí se povrchově navlhčit, aby materiál nabobtnal a uvolnily se z něj lepkavé látky a silice (těkavé, ve vodě nerozpustné látky[13]). [12]

Celý proces peletování se skládá z těchto technologických procesů[14]:

- Příjem materiálu
- Šrotování
- Peletizace

Příjem materiálu

Seno nebo sláma se přijímá nejčastěji ve formě balíků, které jsou ve většině případů pomocí drtiče rozebrány. Délka drtě je 5–10 cm. Jiná alternativa pro rozebrání balíků je rozdružovač, který rozebere balík na jednotlivá stébla a ta jsou rozřezána na délku asi 15 cm. Drť či stébla jsou dopravovány do šrotovníku. [14]

Šrotování

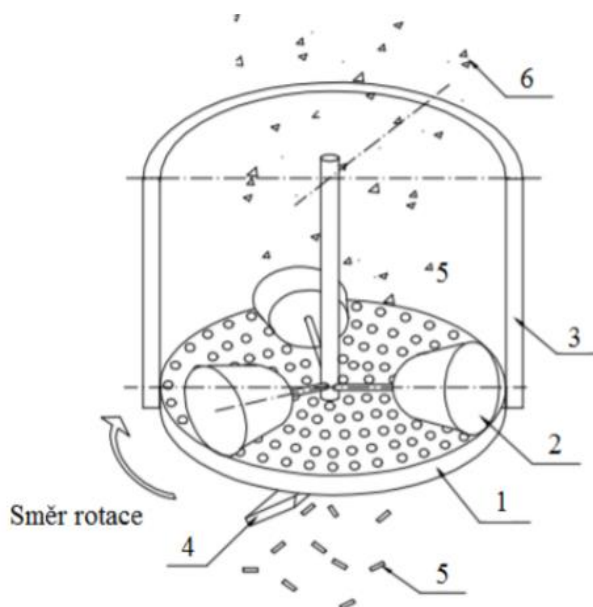
Ve šrotovníku se materiál šrotuje před peletizací na jemnější. Před šrotovníkem musí být třídění nežádoucích materiálů (kov, kamení, ...). [14]

Peletizace

Peletizace se provádí na peletizačním lisu. Peletizační lis se skládá z matrice a rolny. V matrici jsou vyvrtány různé kanálky, které nám udávají tvar, velikost i požadavky pelet. Po matrici se pohybují rolny, které protlačují materiál kanálky, který až dojde k vnější straně matrice, tak jej nože odříznou do hotových výlisků, což jsou válečky o průměru kolem 6 mm a délce 5 mm až 30 mm.

Při výrobě pelet se pomocí velkého tlaku zpracovává drť ze sena, slámy, či jiných zemědělských produktů. Pelety se lisují bez příměsi chemických pojiv a drží ji pohromadě přírodní pojidlo lignin, který vzniká díky uvolněnému teplu při tření, když se surovina protlačuje kanálky. Lignin musí správně zatuhnout, proto se musí pelety ihned po odříznutí výlisků chladit. Pro tvrdost materiálu se používá asi 1–2 % škrobu. Díky tomuto výrobnímu postupu získává peleta dostatečnou pevnost a mechanickou odolnost.

Hotové pelety se skladují v silech a dále se expedují buď v pytlích nebo ve velkých textilních vacích. Dále se dají expedovat pomocí cisterny, kde se pomocí hadic nafoukají přímo do sklepa či kotelny. [15]



Obr. 2.1 Vertikální peletovací stroj [14]

1 – Plochá matrice, 2 – rolny, 3 – lisovací komora, 4 – nože, 5 – pelety, 6 – řezanka

2.2 Fytomasa pro výrobu agropelet

Fytomasa je rostlinná biomasa, kterou tvoří převážně zemědělské rostliny. Pěstování je pro energetické a technické účely velký energetický i ekologický přínos, který se projevuje omezením skleníkových plynů, úsporou fosilních paliv, snížením prašnosti v ovzduší... Rostliny se pěstují přímo pro použití jako biopalivo nebo se jedná o zbytky ze zemědělské výroby. [14]

2.2.1 Řepka olejná

Zde se nejčastěji používá sláma z řepky olejné, kde se výhřevnost při vlhkosti do 10 % pohybuje kolem 15–17 MJ/kg. Sláma řepky se zpracovává stejně jako sláma obilná. Nejčastěji se využívá ve formě balíků a spaluje se v kotlích s většími výkony. Spalování slaměných pelet je možné v automatických kotlích nebo ve speciálních hořácích instalovaných do klasických kotlů. Tyto pelety se ale vyznačují větším množstvím popela než u dřeva. Zde je obsah popela 3–5 %, kdežto u dřeva se pohybuje kolem 0,5–2,5 %. Obsah těžkých kovů v popelu je nízký.

Další možností energetického využití řepky olejné je zpracování na biopalivo (bionaftu). [16]



Obr. 2.2 Řepka olejná [17]



Obr. 2.3 Pšenice [17]

2.2.2 Pšenice

Pšeničnou slámu řadíme mezi kvalitní paliva. Výhřevnost při vlhkosti do 10 % se pohybuje kolem 14,5–15,5 MJ/kg. Obsah popela je 6–7,5 %, což je víc jak u dřeva i u slámy z olejnin. Hrozí spékání popela v ohništi, kvůli jeho nízkým teplotám tavitelnosti. Obsah těžkých kovů v popelu je nízký. [7]

2.2.3 Lnička setá

Lnička setá je jednoletá olejнина, která je vhodná pro všechna stanoviště (jak nížiny, tak podhůří). Nevhodná stanoviště pro tuto rostlinu jsou těžká, kyselá, zamokřená nebo zaplavená. Je velice odolná vůči suchu. Výška této rostliny je 50–100 cm. Semena obsahují 33–44 % oleje, který lze potravinářsky využít. Slupky a sláma mohou být slisovány na agropelety. Výhřevnost slámy při vlhkosti do 10 % se pohybuje kolem 16–17 MJ/kg a výhřevnost semene je okolo 20–22 MJ/kg. [18]



Obr. 2.4 Lnička setá [17]



Obr. 2.5 Konopí seté [17]

2.2.4 Konopí seté

Konopí je jednoletá rostlina, která dorůstá do výšky až 2 m. Tato rostlina vyžaduje teplé a vlhké prostředí a má značné nároky na půdu. Nejlepší je půda hlinitá či písčitohlinitá, která je dobře vyhnojená, bohatě zásobovaná humusem a má malý obsah spodní vody. Semena lze využít pro výrobu tuků, které jsou pak použity v chemickém či farmaceutickém průmyslu. Sláma se pak používá pro spalování. Výhřevnost slámy se pohybuje kolem 18 MJ/kg a výhřevnost semene při vlhkosti do 10 % se pohybuje kolem 22–23 MJ/kg. Samotné stonky se dají slisovat či svázat a použít k vytápění. [18]

2.2.5 Bojínkové seno

Bojínkové seno, je kvalitní seno z luční rostliny. Výhřevnost při vlhkosti do 10 % se pohybuje kolem 14–15 MJ/kg. Obsah popela je vyšší než u dřeva i slámy a to 7–10 %. Obsah těžkých kovů v popelu je nízký [7].



Obr. 2.6 Bojínkové seno [17]



Obr. 2.7 Triticale [17]

2.2.6 Triticale

Jiný název je žitovec. Tato rostlina je kříženec pšenice a žita. Triticale je skromnější na půdní a přírodní podmínky než pšenice, tudíž je výnosově stabilnější v oblastech, kde se pšenici nedaří. Slámu a zrno lze použít pro energetické účely. Zrno lze také využít jako zdroj škrobu k průmyslovému zpracování. Výhřevnost této rostliny při vlhkosti do 10 % se pohybuje kolem 15–16 MJ/kg. [18, 19]

2.2.7 Krmný šťovík

Šťovík je asi 1,5–2 m vysoká a vytrvalá rostlina, která dokáže vydržet na místě svého výskytu až 10 let. Při dodržení správných pěstitelských postupů lze zajistit palivo na několik po sobě následujících let, a to hned od druhého roku po zasetí, aniž by musel být založen nový porost. Energetické využití této rostliny se v ČR začíná značně rozvíjet. Nový obrost kromě energetického využití, lze použít i pro zemědělství na siláž nebo na zelené krmení. Zelený šťovík je možné využít i pro výrobu bioplynu. Výhřevnost šťovíku při vlhkosti do 10 % se pohybuje kolem 16 MJ/kg. [18, 20]



Obr. 2.8 Krmný šťovík [20]



Obr. 2.9 Kukuřice [17]

2.2.8 Kukuřice

Kukuřice má podobné palivové vlastnosti jako řepka nebo pšenice. Mají vysoký obsah popela a síry. Kukuřičný škrob se využívá například v papírnictví, stavebnictví nebo ve farmaceutickém průmyslu. Celou rostlinu, zbytky nebo zrno lze využít k energetickým účelům. Výhřevnost při vlhkosti do 10 % je ale menší, pohybuje se kolem 13,7 MJ/kg. Obsah těžkých kovů v popelu je nízký. [7, 18]

3 Spalování

Spalování patří mezi energetické využití biomasy. Při spalování dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny a další látky [21]. Pomocí okysličování paliva, nejčastěji vzduchem, se uvolňuje chemická energie v palivu, která se mění na tepelnou energii. Jsou rozpoznávány dva druhy chemických reakcí. Exotermická reakce, při které se teplo uvolňuje a endotermická reakce, kde se naopak teplo do reakce přivádí. Aby bylo dosaženo dokonalého spalování, musí být dosaženo vysoké teploty a palivo se musí účinně promísit se vzduchem.

Produktem spalování jsou tuhý (škvára) nebo kapalný (struska) zbytek a plynné spaliny, které obsahují jemné tuhé částičky a směsi plynů [3].

3.1 Emise

Emise jsou látky, které znečišťují ovzduší. Lze je najít v nosném odpadním plynu (spalinách), které vystupují od zdroje znečištění (nejčastěji komín od kotelny) do atmosféry a odráží se na kvalitě ovzduší [22]. Emise závisí např. na složení paliva, teplotě spalování nebo přebytku vzduchu. U biomasy jsou sledovány oxidy uhlíku, dusíku a tuhé znečišťující látky. Oxidy síry se nesledují, protože biomasa obsahuje minimální množství síry. Nejvyšší povolená koncentrace znečišťujících látek je určena podle zákona tzv. emisními limity [23].

3.1.1 Oxidy uhlíku

Oxidy uhlíku, či samotný uhlík jsou závislé především na dokonalosti technologického spalování. Zde je čerpáno ze zdrojů [23,24].

- **Uhlík** – samotný uhlík najdeme v podobě sazí, což jsou nespálené částičky paliva. Příčinou vzniku je rychlé ochlazené plamene. Důsledky vzniku sazí jsou zanášení plic živočichů a pórů rostlin, čímž se zamezuje tvorbě fotosyntézy. Uhlík je velmi porézní a často se na něj váží těžké kovy, které jsou velkým nebezpečím pro živočichy.
- **Oxid uhelnatý (CO)** – vzniká nedokonalým spálením uhlíku, z výfuků aut a letadel, při sopečné činnosti a lesních požárech. Je to bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu, nedráždivý a jedovatý plyn. Mírně lehčí než vzduch. Dopad vzniku CO jsou energetické ztráty. U živočichů způsobuje otravu, protože má vysokou přílnavost k hemoglobinu. Opatření proti vzniku CO je spalování s optimálním přebytkem vzduchu.
- **Oxid uhličitý (CO₂)** – vzniká dokonalým spálením uhlíku nebo dýcháním živočichů. Je to bezbarvý plyn bez zápachu. Ve větším množství má kyselou chuť a působí štiplavě na sliznicích. Je těžší než vzduch. Podílí se na skleníkovém efektu, což je jednou z příčin globálního oteplování. Při spalování biomasy je produkce CO₂ srovnatelná s množstvím, které spotřebovávají rostliny ke svému růstu. Omezit vznik CO₂ můžeme pouze tím, že nebudeme spalovat palivo, které má v sobě uhlík.

3.1.2 Oxidy dusíku

Vznikají při spalování biomasy, ale hlavním zdrojem vzniku NO_x jsou motorová vozidla. U obou případů se objevují vysoké teploty hoření a dochází tak k oxidaci vzdušného a palivového dusíku. Další možný vznik NO_x je při chemických procesech nebo z přírodních zdrojů. Zde je čerpáno ze zdroje [24].

3 hlavní druhy vzniku oxidů dusíku ze spalování:

- **Palivové** – vznik při oxidaci palivového dusíku. Možná eliminace je, že by palivo neobsahovalo dusík, což se moc eliminovat nedá, protože každé palivo obsahuje dusík.
 - **Termické** – vznik při oxidaci vzdušného dusíku z atmosféry. Množství vzniklých NO_x je závislé na teplotě spalování a na době setrvání ve spalovací komoře. Lze je eliminovat tím, že bychom spalovali pouze s kyslíkem.
 - **Promptní** – vznik při spalování uhlovodíků
-
- **Oxid dusnatý (NO)** – Intenzivně vzniká při spalování nad 1000 °C. Je to bezbarvý, jedovatý plyn. Likviduje ozonovou vrstvu. V ovzduší dále oxiduje na NO_2
 - **Oxid dusičitý (NO_2)** – Dráždivý, prudce jedovatý, červenohnědý plyn štiplavého zápachu. Je součástí kyselých dešťů, které mají negativní vliv na přírodu. NO_2 přispívá k tvorbě přízemního ozonu a ke vzniku tzv. fotochemického smogu. Je rozpustný ve vodě, proto se k jeho eliminaci používá mokrá vypírka, nebo přírodní déšť.

3.1.3 Tuhé znečišťující látky (TZL)

Jsou to tuhé a kapalné částice o rozměrech 1 nm–100 μm . Primárně vznikají při procesu spalování, sekundárně při kondenzaci nebo chemických reakcích. Vážou se na ně velmi jedovaté složky, což je pro živočichy nebezpečné, protože tyto částice běžně vdechují. Primární opatření je optimalizace proudění vzduchu ve spalovací komoře, aby se vše dokonale spálilo. Sekundární opatření jsou odlučovače TZL. Velmi sledované jsou částice PM_{10} (průměr částice je 10 μm), $\text{PM}_{2,5}$ a začíná se sledovat i PM_1 . [24]

3.2 Norma ČSN EN 303-5 (Emisní limity)

Emisní limity jsou uvedeny v normě ČSN EN 303-5. Tato norma nám rozděluje zařízení do tříd. Do roku 2014 existovali kotle třídy 1, 2 a 3. V roce 2014 proběhla novelizace, kde zanikla 1. a 2. třída a nyní existuje 3. 4. a 5. třída.

Mezní hodnoty emisí dle normy ČSN EN 303-5 najdeme v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Mezní hodnoty emisí dle normy ČSN EN 303-5 [25]

Dodávka paliva	palivo	Jmenovitý tepelný výkon	CO			OGC (uhlovodíky)			prach		
			Třída 3	Třída 4	Třída 5	Třída 3	Třída 4	Třída 5	Třída 3	Třída 4	Třída 5
		[kW]	mg/m ³ při 10 % O ₂								
Ruční	biomasa	≤ 50	5000	1200	700	150	50	30	150	75	60
		>50≤150	2500	1200	700	100	50	30	150	75	60
		>150≤500	1200	1200	700	100	50	30	150	75	60
Samočinné	biomasa	≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	150	60	40
		>50≤150	2500	1000	500	80	30	20	150	60	40
		>150≤500	1200	1000	500	80	30	20	150	60	40
Ruční	Fosilní palivo	≤ 50	5000	1200	700	150	50	30	125	75	60
		>50≤500	2500	1200	700	100	50	30	125	75	60
		>150≤500	1200	1200	700	100	50	30	125	75	60
Samočinné	Fosilní palivo	≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	125	60	40
		>50≤150	2500	1000	500	80	30	20	125	60	40
		>150≤500	1200	1000	500	80	30	20	125	60	40

3.3 Směrnice o požadavcích na ekodesing

V roce 2015 byla vydána Směrnice o požadavcích na ekodesing kotlů na tuhá paliva, kde došlo ke zpřísnění požadavků na spalovací zařízení a bude platná od 1.1.2020.

Kotle na tuhá paliva budou muset splňovat požadavky uvedené v tabulce 3.2.

Tab. 3.2 Hodnoty emisních limitů a účinností podle Směrnice o ekodesignu [26]

Parametry	Příkládání	Limitní hodnoty
Prach [mg/m ³]	Ruční	60
	Samočinné	40
OGC[mg/m ³]	Ruční	30
	Samočinné	20
CO[mg/m ³]	Ruční	700
	samočinné	500
	Druh kotle	
Oxidy dusíku [mg/m ³]	Na biomasu	200
	Na fosilní paliva	350
	Výkon kotle	
účinnost[%]	≤ 20 kW	75
	> 20 kW	77

Při porovnání normy ČSN EN 303-5 a Směrnice o požadavcích na ekodesing kotlů na tuhá paliva je možno vidět, že emisní limity pro prach, organické plynné sloučeniny (OGC) a oxid uhelnatý zůstávají pořád stejné. U požadavků na ekodesing přibyly pouze emise oxidů dusíku a sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů η_s , což znamená poměr mezi potřebou vytápění vnitřních prostorů pro určené topné období kotlem na tuhá paliva a roční spotřebou energie potřebnou ke splnění této potřeby [27]. Sezónní účinnost lze spočítat dle rovnice (4)

$$\eta_s = \eta_{son} - F(1) - F(2) + F(3) \quad (4)$$

Kde	η_{son}	sezónní energetická účinnost v aktivním režimu
	F(1)	ztráta sezónní energetické účinnosti vytápění vnitřních prostorů v důsledku upravených příspěvků regulace teploty (F(1) = 3 %)
	F(2)	záporný příspěvek ze spotřeby pomocné elektrické energie
	F(3)	kladný příspěvek z elektrické účinnosti kogeneračních kotlů na tuhá paliva

V tabulce 3.3 můžeme vidět přehled nařízení týkajících se prodeje a provozu kotlů na tuhá paliva.

Tab. 3.3 Provoz a prodej kotlů na tuhá paliva podle Směrnice o ekodesignu [26]

Platnost od	Nařízení
1.1.2014	Zákaz prodeje kotlů 1. a 2. emisní třídy
1.1.2017	Povinnost předložit revizi kotle na vyžádání
1.1.2018	Zákaz prodeje kotlů 3. emisní třídy
1.1.2020	Zákaz prodeje kotlů 4. emisní třídy
1.1.2022	Zákaz používání kotlů 1. a 2. emisní třídy

3.4 Účinnost kotle

Účinnost kotlů udává míru využití energie z paliva a lze ji určit přímou a nepřímou metodou. Minimální hodnoty účinnosti lze vidět v následující tabulce.

Tab. 3.4 Požadavky na účinnost kotle při jmenovitém výkonu 25 kW [25]

Třída kotle	Minimální hodnoty účinnosti v %
3. třída	75,4
4. třída	82,8
5. třída	88,4

3.4.1 Přímá metoda

Výpočet účinnosti kotle přímou metodou lze provést z energie dodané a vyrobené podle rovnice (5). [3]

$$\eta_k = \frac{\text{výkon kotle}}{\text{příkon kotle}} = \frac{\dot{m}_w \cdot (i_{w2} - i_{w1})}{Q_i^r \cdot \dot{m}_{pal}} \quad [\%] \quad (5)$$

Kde	\dot{m}_w	[kg/s]	hmotnostní tok vody protékající kotlem
	i_{w1}	[kJ/kg]	entalpie vody vstupující do kotle
	i_{w2}	[kJ/kg]	entalpie ohřáté vody na výstupu z kotle
	Q_i^r	[kJ/kg]	výhřevnost spalovaného paliva
	\dot{m}_{pal}	[kg/s]	hmotnostní tok spalovaného paliva

U kotlů na tuhá paliva se často vyskytuje problém s přesným stanovením spotřeby paliva, neboť velké kotle obsahují mezizásobníky paliva a u malých kotlů se nedá vždy zjistit tzv. „základní vrstva“ hořícího paliva na začátku a na konci měření účinnosti. Díky těmto problémům má často přímá metoda značnou chybu měření, a proto se pro určení účinnosti častěji používá nepřímá metoda.

3.4.2 Nepřímá metoda

Výpočet účinnosti kotle nepřímou metodou je založen na určení jednotlivých ztrát kotle. Vychází se z toho, že teoretická účinnost ideálního kotle, která je 100 % je ponížena o ztráty kotle. Výpočet lze vidět v rovnici (6). Tato podkapitola je čerpána ze zdroje [25, 28].

$$\eta_k = 100 - (q_a + q_b + q_r + q_s) \quad [\%] \quad (6)$$

Kde	q_a	[%]	poměrná ztráta citelným teplem
	q_b	[%]	poměrná ztráta chemickým nedopalem
	q_r	[%]	poměrná ztráta mechanickým nedopalem
	q_s	[%]	poměrná ztráta sáláním, konvekcí a kondukcí

Poměrná ztráta citelným teplem spalin q_a

Tato ztráta je často označována jako komínová. Zásadní vliv na ni má teplota spalin za kotlem a součinitel přebytku vzduchu za kotlem (souvisí s těsností kotle). Ze všech ztrát kotle bývá tato ztráta největší [3]. Její hodnota je dána následujícím vztahem.

$$q_a = \frac{(t_{sp} - t_o) \cdot 100}{Q_i^r} \cdot \left[\frac{c_{p_{sp}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (V_{CO} + V_{CO_2})} + \frac{c_{p_{H_2O}} \cdot 1,224 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right] \quad [\%] \quad (7)$$

Kde	t_{sp}	[°C]	teplota spalin na výstupu z kotle
	t_o	[°C]	teplota okolí
	$c_{p_{sp}}$	[kJ.m ³ /K]	střední měrná tepelná kapacita spalin
	$c_{p_{H_2O}}$	[kJ.m ³ /K]	střední měrná tepelná kapacita vody
	C_r	[%]	podíl uhlíku v nespálených zbytcích
	C	[%]	podíl uhlíku v palivu
	V_i	[%]	poměrná koncentrace dané látky ve spalinách

Komínovou ztrátu lze ovlivnit snížením teploty spalin za kotlem a spalováním s minimálním přebytkem vzduchu. Teploty spalin však nesmí klesnout po rosný bod spalin, protože by docházelo ke kondenzaci vodní páry, což vede ke vzniku nízkoteplotní koroze ze strany spalin. Přbytek vzduchu je snižován s ohledem na spalování, aby nedocházelo k zvýšení míry nedokonalosti spalování, a tím i ke zvýšení ztráty chemickým nedopalem [3].

Poměrná ztráta chemickým nedopalem q_b

Tato ztráta je způsobena nedokonalým spálením prchavé hořlaviny z paliva. Největší podíl v prchavé hořlavině zaujímá CO [3]. Lze ji spočítat podle následujícího vztahu.

$$q_b = \frac{12664 \cdot V_{CO} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (V_{CO_2} + V_{CO}) \cdot Q_i^r} \quad [\%] \quad (8)$$

Poměrná ztráta mechanickým nedopalem q_r

Tato ztráta vzniká vlivem nevyhořelého uhlíku v tuhých zbytcích, které odchází ze spalovací komory. Mezi tuhé zbytky se řadí struska nebo škvára (s), popílek (p) a roštový propad (r) [3]. Tuto ztrátu lze vypočítat podle následující rovnice.

$$q_r = \frac{335 \cdot A^r \cdot b}{Q_i^r} \quad [\%] \quad (9)$$

Kde	A^r	[%]	obsah popeloviny
	b	[%]	obsah uhlíku obsaženého v tuhých zbytcích paliva

Poměrná ztráta sáláním, kondukcí a konvencí

$$q_s = \frac{\lambda \cdot \tau \cdot \Sigma[S \cdot (t_i - t_o)]}{m_{pal} \cdot Q_i^r} \quad [\%] \quad (10)$$

Kde	λ	[W/m ² .K]	součinitel přestupu tepla z vnějšího povrchu kotle do okolí
	τ	[s]	doba měření
	S	[m ²]	dílčí plocha stěny kotle
	t_i	[°C]	teplota povrchu kotle
	t_o	[°C]	teplota okolí
	m_{pal}	[kg]	hmotnost spáleného paliva

4 Experimentální část

Jedním z cíle této bakalářské práce bylo porovnání účinnosti a emisní třídy kotle pro různé agropelety. Experimentem bylo provedeno měření plynných emisí, TZL a účinnosti dvou druhů paliv. Byly měřeny agropelety ze sena (průměr 6 mm) a ze špaldy (průměr 8 mm) na kotli Verner A251.1, jehož základní technické parametry jsou uvedeny v tabulce 4.1. Tento automatický teplovodní kotel je určen pro spalování obilí, dřevěných a rostlinných pelet. Kotel má šnekový dopravník, kterým je palivo dopravováno do spalovací komory. Interval plnění paliva je možné na tomto kotli nastavit. Palivo se ve spalovací komoře pomocí automatického zápalu rozhoří. Automatický zápal spočívá v přívodu teplého primárního vzduchu. Pomocí pohyblivého roštu je popel posouván do popelníku. Měření proběhlo pro 3 různé koncentrace kyslíku. Různých koncentrací bylo dosaženo změnou otáček na ventilátoru.

Jak lze vidět na obrázku 4.1, při pohledu na spalovací komoru, popel do popelníku odchází spečený, protože seno a špalda mají nízkou teplotu tavení popele.

Tab. 4.1 Technické parametry kotle Verner A251.1 [29]

typ	Verner A251.1
Jmenovitý výkon	25 kW
Účinnost	92 %
Spotřeba paliva (při jmenovitém výkonu)	
- Dřevní pelety	5,8 kg/h
- Rostlinné pelety	6,3 kg/h
- obilniny	6,8 kg/h
Objem násypky	240 dm ³
Teplota spalin na výstupu při jmenovitém výkonu	120 °C
Pracovní rozsah výstupní teploty vody	65-90 °C
Minimální teplota vratné vody v provozu	60 °C
Předepsaný provozní tah komína	15 Pa
Třída účinnosti	3
Emisní třída	3



VERNER Sokolská 321 a.s. Červený Kostelec	
TYP: TEPELOVODNÍ KOTEL VERNER A251.1	
VÝR. ČÍSLO / ROK VÝROBY	911 / 08
JMENOVITÝ TEPELNÝ VÝKON	25 kW
HMOTNOST KOTLE	520 kg
NEJVYŠŠÍ PROVOZNÍ PŘETLAK VODY	0,3MPa
NEJVYŠŠÍ PROVOZNÍ TEPLOTA VODY	95°C
VODNÍ OBJEM KOTLE	60 l
ELEKTRICKÉ NAPĚTÍ / KMITOČET	230V / 50 Hz
ELEKTRICKÝ PŘÍKON KOTLE	MAX. 1,5 kW
DRUH KRYTÍ ELEKTR. ČÁSTÍ	IP 41
EMISNÍ TŘÍDA KOTLE	3

Obr. 4.1 Kotel Verner A251.1 – zleva kotel, spalovací komora, štítek kotle

4.1 Měření plynných emisí

Při měření plynných emisí byly použity přístroje SIEMENS ULTRAMAT 21 a 22, které zaznamenávaly hodnoty CO, NO v jednotkách [mg/m³] a hodnoty O₂ [%_{obj}]. V průběhu měření byly zobrazovány hmotnostní průtoky emisí na displeji v aktuálním čase a každých 20 s jsou tyto hodnoty ukládány do mezi-paměti přístroje. Přístroj poté každou minutu z hodnot uložených v mezi-paměti vypočítá průměrnou hodnotu, která je uložena v paměti počítače. Tyto hodnoty lze uložit v textovém formátu a lze je použít pro vyhodnocení měření.



Obr. 4.2 SIEMENS ULTRAMAT

4.1.1 Výsledky plynných emisí

Hodnoty plynných emisí byly zaznamenávány každou minutu do textového souboru bez ohledu na to, zda měření probíhalo nebo ne. Proto musela být data vybrána z časového intervalu, ve kterém měření probíhalo. Z následujících hodnot byl vypočten aritmetický průměr naměřených koncentrací CO, NO a O₂ a ty musely být přepočteny na referenční obsah kyslíku 10 %, aby nedocházelo k ředění škodlivin vzduchem a na normální podmínky. Přepočet se provádí pomocí rovnice

$$c_r = c_m \cdot \frac{T_n}{T} \cdot \frac{21 - O_2^r}{21 - O_2^m} \quad [\text{mg/m}^3] \quad (11)$$

Kde	c_m	[mg/m ³]	průměrná naměřená koncentrace škodlivin
	T_n	[K]	teplota při normálních podmínkách = 273,15 K
	T	[K]	teplota okolí
	O_2^m	[%]	průměrný obsah naměřeného kyslíku
	O_2^r	[%]	referenční obsah kyslíku = 10 %

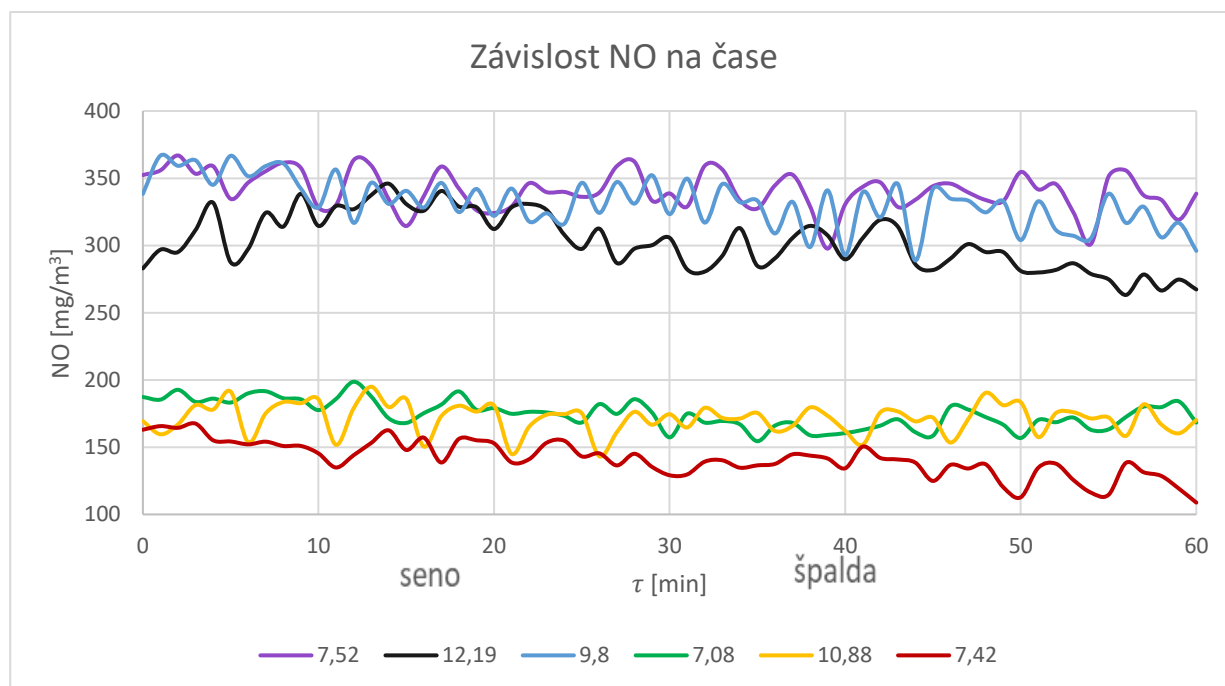
Měření bylo provedeno pro tři různé hladiny kyslíku. Hodnoty této zkoušky jsou uvedeny v tabulce 4.2

Tab. 4.2 Přehled zkoušky plyných emisí

palivo	O ₂	NO	CO	NO _{ref}	CO _{ref}	teplota spalin
	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[°C]
seno	7,52	324,35	379,67	245,47	287,34	244,91
	9,80	323,27	166,54	294,51	151,72	225,94
	12,19	285,21	231,71	330,24	268,29	257,13
špalda	7,08	174,17	479,08	127,63	351,08	218,24
	7,42	140,17	190,08	105,28	142,76	217,49
	10,88	170,81	138,54	172,09	139,58	237,76

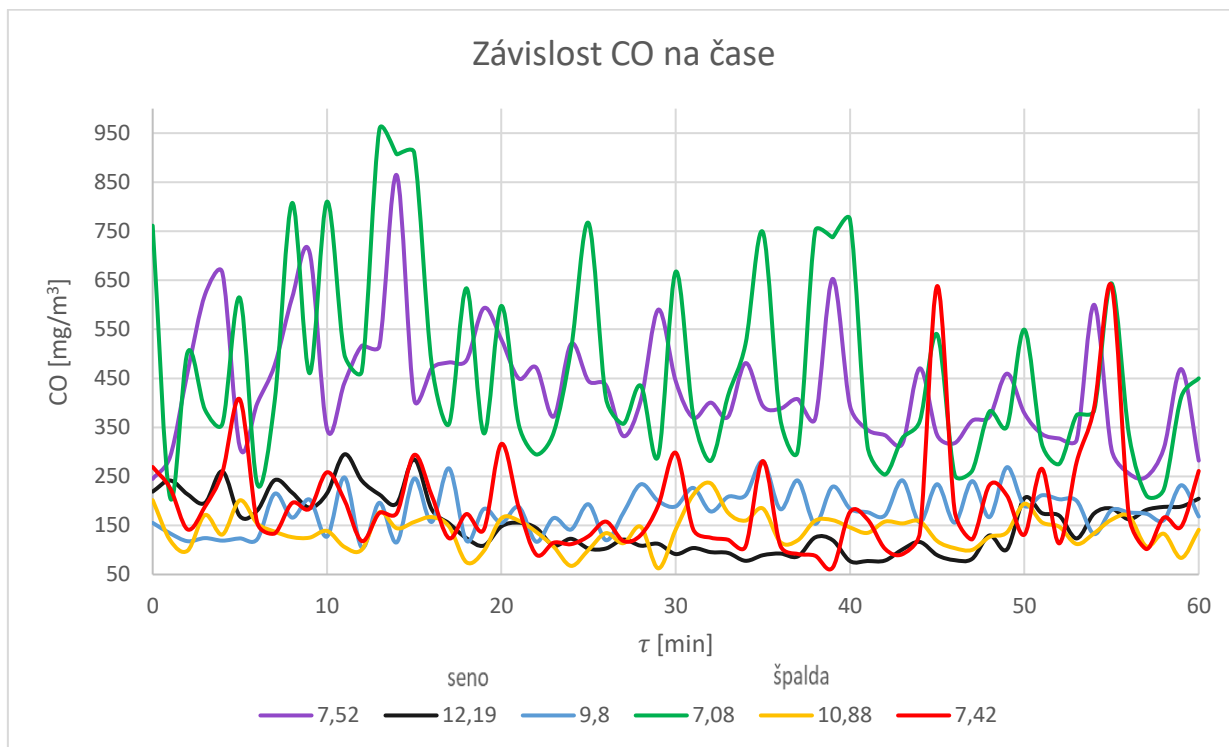
Při porovnání hodnot s normou ČSN EN 303-5 a se Směrnicí o požadavcích na ekodesing, pelety ze sena a ze špaldy, z hlediska emisí CO, lze zařadit do 5. emisní třídy, jejíž hranice je 500 mg/m³. Požadavky na ekodesing kotlů podle koncentrací NO splňují pouze pelety ze špaldy, kde hranice NO je 200 mg/m³.

Pro lepší znázornění byly vytvořeny následující grafy, kde lze porovnat naměřené koncentrace NO a CO pro různé hladiny kyslíku u špaldy a u sena.



Obr. 4.3 Závislost NO na čase

Při porovnání oxidů dusíku u sena a špaldy lze vidět, že u špaldy při spalování vznikají menší emise dusíku než u sena. U špaldy se koncentrace NO pohybuje mezi 100–200 mg/m³, zatímco u sena se emise pohybují v rozmezí 300–370 mg/m³, což je téměř dvojnásobek toho, co u špaldy.



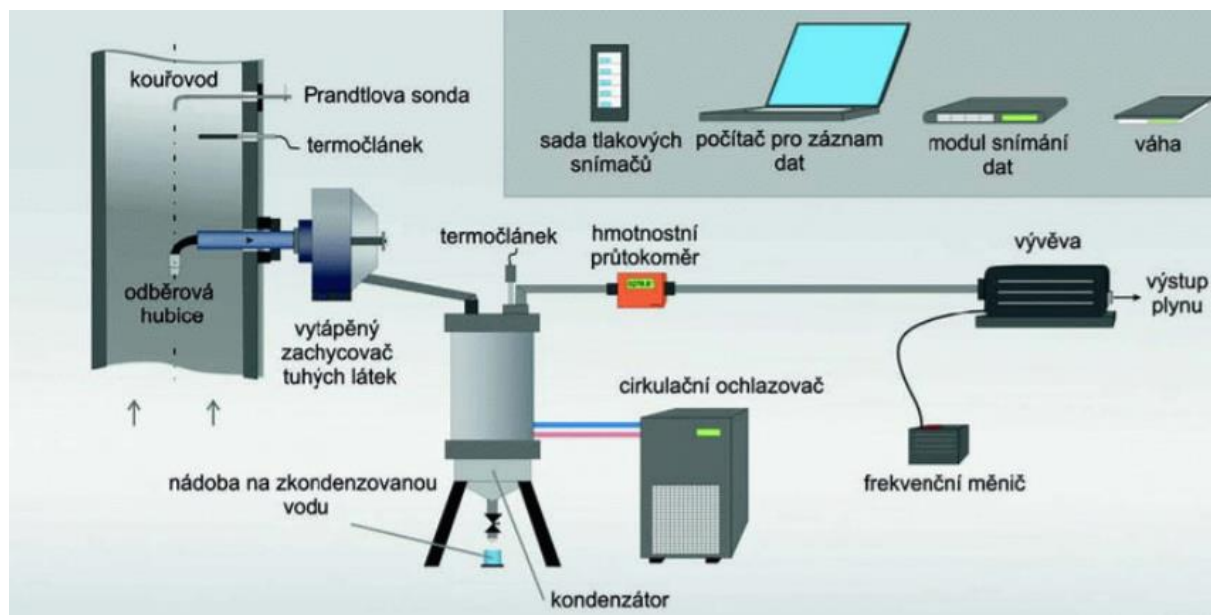
Obr. 4.4 Závislost CO na čase

V grafu na obrázku 4.4 lze pozorovat, že při nízkých koncentracích kyslíku, je produkce CO vyšší. Při koncentracích kyslíku kolem 10–12 % je produkce CO u špaldy a sena téměř stejná a pohybuje se mezi 100–250 mg/m³.

4.2 Měření TZL

Pro určení obsahu TZL se používá izokinetická gravimetrická metoda.

Princip této metody závisí na izokinetickém odběru vzorku plynu za spalovacím zařízením. Izokinetický odběr znamená, že rychlost spalin v kouřovodu je stejná jako rychlost spalin proudící do odběrové hubice. Plyn proudí z odběrové hubice přes keramický filtr, který se před umístěním do odběrové hadice, kvůli odstranění vlhkosti, musí vyžít a poté zvážit. Čím víc se filtr zanáší, tím se zmenšuje průtok plynu, a tím i rychlost spalin proudící do odběrové hubice. Aby byl izokinetický odběr dodržen, je použita vývěva vyvíjející podtlak, kterou lze regulovat škrtkicím ventilem. Podtlakem jsou spaliny odsávány. Jelikož odebírané spaliny mají vysokou teplotu, která je měřena termočlánky, musí být spaliny ochlazeny zhruba na 15 °C, aby hmotnostní průtokoměr nebyl zničen. Schéma zapojení těchto přístrojů je zobrazeno na obrázku 4.5. [30]



Obr. 4.5 Měřicí soustava pro stanovení koncentrace TZL [30]

Na začátku této zkoušky je zvážen vysušený filtr, který je poté umístěn do měřicího okruhu, který se uzavře a začne zkouška. Podle normy doba zkoušky je nejméně 30 min. Po změření je filtr opět vysušen a zvážen. Sušení probíhá asi hodinu při teplotě 160 °C. Ze změřených hmotností je vypočítán rozdíl a tím je získána hmotnost zachycených prachových částic.

4.2.1 Výsledky TZL

Měření probíhalo po dobu 30 min. Pro odběr spalín byla použita hubice o průměru 18 mm. Z hmotnosti zachycených prachových částic, objemu odebraného vzorku a z koncentrace naměřeného O₂ ULTRAMATEM byly vypočteny koncentrace prachových částic podle rovnice (12). Z jednotlivých koncentrací byly vypočteny aritmetické průměry. Podle normy ČSN EN 303-5 má být tento aritmetický průměr vypočten nejméně ze čtyř naměřených hodnot, což nebylo dodrženo z časových důvodů. Pro seno proběhly tři měření, pro špaldu pouze dvě měření.

$$c_r^{TZL} = \frac{\Delta m}{Q} \cdot \frac{T_n}{T} \cdot \frac{21 - O_2^r}{21 - O_2^m} \quad [\text{mg/m}^3] \quad (12)$$

Data této zkoušky jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Tab. 4.3 Přehled zkoušky TZL

palivo	O ₂	c_r^{TZL}
sena	[%]	[mg/m ³]
	7,52	74,68
	9,08	75,80
špalda	12,19	83,67
	7,08	98,05
	7,42	85,26
	10,88	136,82



Obr. 4.6 Odebrané vzorky TZL

Při porovnání hodnot s normou ČSN EN 303-5 lze pelety ze sena a ze špaldy, z hlediska emisí TZL, zařadit do 3. emisní třídy při všech naměřených koncentracích kyslíku. Hranice koncentrace TZL pro 3. emisní třídu je 150 mg/m³.

Požadavky na ekodesing kotlů podle koncentrací TZL, kde hranice je 40 mg/m³, tyto pelety nesplňují.

4.3 Účinnost

Pro určení účinnosti nepřímou metodou je potřeba znát prvkový a hrubý rozbor pelet. Hrubý rozbor byl změřen v palivové laboratoři na energetickém ústavu. Pro prvkový rozbor sena byla použita databáze [31] a pro špaldu byl prvkový rozbor převzat z odborného článku [32].

Tab. 4.4 Prvkový rozbor sena [31]

uhlík	vodík	dusík	síra	kyslík	uhlík v tuhých zbytcích
C	H	N	S	O	b
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
43,07	5,81	1,74	0,22	39,44	19,07

Tab. 4.5 Hrubý rozbor sena

vlhkost	Výhřevnost	spalné teplo	popelovina	Prchavá hořlavina
W	Q_i^r	Q_s	A^r	h
[%]	[MJ/kg]	[MJ/kg]	[%]	[%]
12,88	14,38	15,974	8,02	89,99

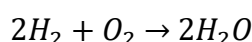
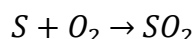
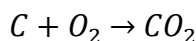
Tab. 4.6 Prvkový rozbor špaldy [32]

uhlík	vodík	dusík	síra	kyslík	uhlík v tuhých zbytcích
C	H	N	S	O	b
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
51,8	7,06	0,804	0,071	35,5	24,24

Tab. 4.7 Hrubý rozbor špaldy

vlhkost	Výhřevnost	spalné teplo	popelovina	Prchavá hořlavina
W	Q _i ^r	Q _s	A ^r	h
[%]	[MJ/kg]	[MJ/kg]	[%]	[%]
8,06	15,2	16,947	4,42	88,42

Pro výpočet minimálního potřebného množství účinnosti se vychází z následujících rovnic spalování.



Vzorové pomocné výpočty pro seno a hladinu kyslíku 7,52 %

- Minimální potřebné množství kyslíku

$$V_{O_2 min} = \frac{V_{M_{O_2}}}{100} \cdot \left(\frac{C}{M_C} + \frac{S}{M_S} + \frac{H_2}{M_{H_2}} - \frac{O_2}{M_{O_2}} \right)$$

$$V_{O_2 min} = \frac{22,414}{100} \cdot \left(\frac{43,07}{12,01} + \frac{0,22}{32,06} + \frac{5,81}{4,03} - \frac{39,44}{32} \right) = 0,85 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

- Minimální množství spalovacího vzduchu

$$V_{vz min}^s = V_{O_2 min} \cdot \frac{100}{21} = 0,85 \cdot \frac{100}{21} = 4,058 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

$$V_{vz min} = f \cdot V_{vz min}^s = 1,016 \cdot 4,085 = 4,123 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

Pro běžné klimatické podmínky (20 °C a 70% relativní vlhkosti) se volí koeficient f=1,016.

- Minimální množství spalín

$$V_{CO_2 s} = \frac{V_{M_{CO_2}}}{100} \cdot \frac{C}{M_C} + 0,0003 \cdot V_{vz min}^s = \frac{22,414}{100} \cdot \frac{43,07}{12,01} + 0,0003 \cdot 4,058 = 0,805 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

$$V_{N_2 s} = \frac{V_{M_{N_2}}}{100} \cdot \frac{N_2}{M_{N_2}} + 0,7805 \cdot V_{vz min}^s = \frac{22,414}{100} \cdot \frac{1,74}{28,013} + 0,7805 \cdot 4,058 = 3,181 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

$$V_{SO_2 s} = \frac{V_{M_{SO_2}}}{100} \cdot \frac{S_2}{M_{S_2}} + 0,7805 \cdot V_{vz min}^s = \frac{22,414}{100} \cdot \frac{0,22}{32,06} = 0,002 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

$$V_{Ars} = 0,0092 \cdot V_{vz min}^s = 0,0092 \cdot 4,058 = 0,037 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

$$V_{H_2O} = \frac{2 \cdot V_{M_{H_2O}}}{100} \cdot \frac{H_2}{M_{H_2}} + \frac{W^r}{100} \cdot \frac{V_{M_{H_2O}}}{M_{H_2O}} + (f - 1) \cdot V_{vz \min}^s$$

$$V_{H_2O} = \frac{2 \cdot 22,414}{100} \cdot \frac{5,81}{4,03} + \frac{12,88}{100} \cdot \frac{22,414}{18,015} + (1,016 - 1) \cdot 4,058 = 0,871 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

- Minimální objem suchých spalín

$$V_{sp \min}^s = V_{CO_2s} + V_{N_2s} + V_{SO_2s} + V_{Ars} = 0,805 + 3,181 + 0,002 + 0,037 = 4,025 \text{ m}^3/\text{kg}$$

- Minimální objem vlhkých spalín

$$V_{sp \min} = V_{sp \min}^s + V_{H_2O} = 4,025 + 0,871 = 4,896 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

- Přebytek vzduchu

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2^m} = \frac{21}{21 - 12} = 1,56$$

- Skutečné množství vlhkých spalín

$$V_{sp \text{ skut}} = V_{sp \min} + (\alpha - 1) \cdot V_{vz \min} = 4,896 + (1,56 - 1) \cdot 4,123 = 7,2 \text{ m}^3/\text{kg}_{pal}$$

- Obsah CO₂ ve spalínách

$$V_{CO_2 \max} = \frac{V_{CO_2s}}{V_{sp \min}^s} \cdot 100 = \frac{0,805}{4,025} \cdot 100 = 20 \%$$

$$V_{CO_2} = \frac{V_{CO_2 \max}}{\alpha} = \frac{20}{1,56} = 12,82 \%$$

- Střední měrná tepelná kapacita spalín

$$c_{p_{sp}} = 3,6 \cdot \left[0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 + \left(0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) \cdot \frac{V_{CO_2}}{100} + \left(0,03 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) \cdot \frac{V_{CO_2}}{100} \right]$$

$$c_{p_{sp}} = 3,6 \cdot \left[0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{244,912}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{244,912}{1000} \right)^2 + \left(0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{244,912}{1000} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{244,912}{1000} \right)^2 \right) \cdot \frac{12,82}{100} + \left(0,03 \cdot \left(\frac{244,912}{1000} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{244,912}{1000} \right)^2 \right) \cdot \frac{12,82}{100} \right] = 1,57 \text{ kJ/kg.K}$$

- Střední měrná tepelná kapacita vody

$$c_{p_{H_2O}} = 3,6 \cdot \left[0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right] = 3,6 \cdot \left[0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{244,912}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{244,912}{1000} \right)^2 \right] = 1,53 \text{ kJ/kg.K}$$

- Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v nespálených zbytcích

$$C_r = A^r \cdot \frac{b}{100} = 8,02 \cdot \frac{19,07}{100} = 1,53 \%$$

- Průměrná koncentrace CO ve spalínách přepočítaná na %

$$V_{CO} = \frac{CO \cdot \rho_{CO}}{10^4} \cdot \frac{21 - O_2^r}{21 - O_2^m} = \frac{379,673 \cdot 1,234}{10^4} \cdot \frac{21 - 10}{21 - 7,52} = 0,04 \%$$

- Výpočet jednotlivých ztrát

Poměrná ztráta citelným teplem spalín = komínová ztráta

$$q_a = \frac{(t_{sp} - t_o) \cdot 100}{Q_i^r} \cdot \left[\frac{c_{p_{sp}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (V_{CO} + V_{CO_2})} + \frac{c_{p_{H_2O}} \cdot 1,224 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right]$$

$$q_a = \frac{(244,912 - 21,67) \cdot 100}{14380} \cdot \left[\frac{1,57 \cdot (43,07 - 1,53)}{0,536 \cdot (0,04 + 12,82)} + \frac{1,53 \cdot 1,224 \cdot (9 \cdot 5,81 + 12,88)}{100} \right] = 16,72 \%$$

Poměrná ztráta chemickým nedopalem

$$q_b = \frac{12664 \cdot V_{CO} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (V_{CO_2} + V_{CO}) \cdot Q_i^r} = \frac{12664 \cdot 0,04 \cdot (43,07 - 1,53)}{0,536 \cdot (12,82 + 0,04) \cdot 14380} = 0,21 \%$$

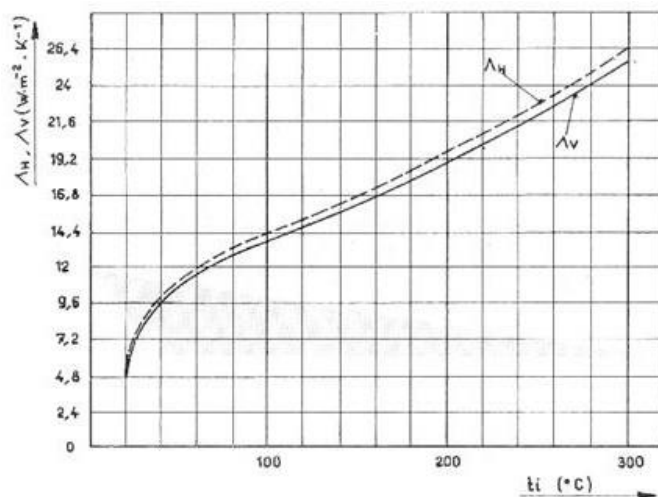
Poměrná ztráta mechanickým nedopalem

$$q_r = \frac{335 \cdot A^r \cdot b}{Q_i^r} = \frac{335 \cdot 8,02 \cdot 19,07}{14380} = 3,56 \%$$

Poměrná ztráta sáláním, konvekcí a kondukcí

$$q_s = \frac{\lambda \cdot \tau \cdot \sum [S \cdot (t_i - t_o)]}{m_{pal} \cdot Q_i^r} = \frac{9 \cdot 5400 \cdot 22,54}{15,48 \cdot 14,38 \cdot 10^6} = 0,49 \%$$

Doba hoření byla 60 minut. Součinitel přestupu tepla byl určen z grafu na obrázku 4.7 podle teploty povrchu kotle, která se pohybovala okolo 30 °C. Jeho hodnota je přibližně 9 W/m².K .



Obr. 4.7 Graf závislosti součinitele přestupu tepla na teplotě povrchu kotle [33]

- Výpočet účinnosti

$$\eta_k = 100 - (q_a + q_b + q_r + q_s) = 100 - (16,72 + 0,21 + 3,56 + 0,49) = 79,02 \%$$

Výsledné hodnoty účinností jsou uvedené v tabulce 4.8.

Tab. 4.8 Přehled vypočtených účinností kotle

palivo	O ₂	účinnost
	[%]	[%]
seno	7,52	79,02
	9,80	77,99
	12,19	70,11
špalda	7,08	79,81
	7,42	79,59
	10,88	72,05

Při porovnání naměřených účinností s normou ČSN EN 303-5 lze seno, při koncentracích kyslíku 7,52 % a 9,80 %, a špaldu, při koncentracích kyslíku 7,08 % a 7,42 %, zařadit do 3. třídy, kde hranice minimální účinnosti je 75,4 %. Při těchto koncentracích kyslíku splňují tyto paliva také požadavky na ekodesing, kde hranice minimální účinnosti pro tento kotel je 77 %. Ostatní hodnoty minimální účinnosti nedosáhly.

ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce byla rešeršní část, která se týkala dostupných druhů biomasy, jejím vlastnostem a spalování biomasy. Druhá část této práce byla praktická, kde se měřily plynné emise, TZL a účinnost různých agropelet při různých koncentracích kyslíku. Tyto výsledky byly porovnány s normou ČSN EN 303-5 a se Směrnicí o požadavcích na ekodesing kotlů.

První kapitola rešeršní části se zabývala vznikem, rozdělením a sledovaným vlastnostem biomasy. Druhá kapitola byla zaměřena na agropelety, jejich výrobu a na fytomasu, ze které se agropelety vyrábějí. Třetí kapitola byla věnována spalování biomasy a jejím emisím s hlavním zaměřením na emisní limity uvedené v normě ČSN EN 303-5 a limitní hodnoty uvedené ve Směrnici o požadavcích na ekodesing kotlů. Dále je zde uveden výpočet účinnosti kotle přímou a nepřímou metodou.

Cílem praktické části bylo provést sérii experimentů spalování pro různé agropelety při různých koncentracích kyslíku.

Spalovací zkouška probíhala na kotli VERNER A251.1. Měření probíhala podle normy ČSN EN 303-5. Pro zkoušky byly použity 2 druhy agropelet, a to ze sena o průměru 6 mm a ze špaldy o průměru 8 mm.

Při porovnání s normou ČSN EN 303-5 a se Směrnicí o požadavcích na ekodesing kotlů z hlediska plynných emisí, pro všechny naměřené koncentrace kyslíku u sena a u špaldy, splňuje kotel 5. emisní třídu i požadavky na ekodesing podle koncentrace CO. Při porovnání naměřených koncentrací NO s limitními, požadavky na ekodesing splňují pouze agropelety ze špaldy.

Z hlediska koncentrací TZL lze kotel, při spalování obou druhů agropelet, zařadit do 3. emisní třídy pro všechny naměřené koncentrace kyslíku. Požadavky na ekodesing však tyto pelety, z hlediska TZL, nesplňují.

Pro výpočet účinnosti byl nejprve proveden hrubý rozbor agropelet. Účinnost agropelet ze špaldy vychází o něco vyšší než u agropelet ze sena, což mohlo být způsobeno tím, že seno obsahovalo větší vlhkost než špalda, tudíž mělo nižší výhřevnost. Podle normy ČSN EN 303-5 splňuje kotel 3. třídu i požadavky na ekodesing pouze při spalování agropelet ze špaldy při koncentracích kyslíku 7,08 %, 7,42 % a ze sena při koncentracích 7,52 % a 9,80 %.

Při porovnání obou paliv lze vidět, že špalda má nižší produkci plynných emisí, ale větší produkci TZL.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SUPUKA, Milan. *Spaľovanie vlhkej biomasy* [online]. Nitra, 2011 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <http://crzp.uniag.sk/Prace/2011/S/D326B251E396472B809FF481BB0D9D35.pdf>. Diplomová práce. Slovenská Poľnohospodárska univerzita v Nitre. Vedoucí práce Doc. Ing., Dr., Juraj Maga.
- [2] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: EUROPRINT, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [3] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [4] ZÁRYBNICKÁ, Michaela. *Biomasa - obnovitelný zdroj energie: Výukový materiál* [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/13/IUT/063_Biomasa_-_Obnovitelny_zdroj_energie_-_Zarybnicka_-_P1.pdf
- [5] KŘEPELKA, Jiří. *Zpracování slámy na topné pelety*. *Zemědělec* [online]. 2012 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.zemedelec.cz/zpracovani-slamy-na-topne-pelety-2/>
- [6] STREĎANSKÁ, Alexandra. *Energetické využití biomasy* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/83300/2018_BP_Stredanska_Alexandra_170360.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Marek Baláš.
- [7] JANDAČKA, Jozef a Milan MALCHO. *Biomasa ako zdroj energie*. Vyd. 1. Žilina: Juraj Štefuň – GEORG, 2007. ISBN 978-80-969161-4-6
- [8] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 8086534065.
- [9] *Vývoj hrubé výroby elektřiny a tepla k prodeji v energetické bilanci ČR: výroba a dodávky v letech 2010-2017* [online]. 2019 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2019/1/Elektrina--teplo-2010-2017.pdf>
- [10] *Agropelety* [online]. 2012 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.rostlinne-pelety.cz/rostlinne-pelety.html>

- [11] *Dřevěné pelety* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.pelety.net/>
- [12] *Česká peleta* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.ceska-peleta.cz/>
- [13] KRMENČÍK, Pavel. *Biotox* [online]. 2007 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.biotox.cz/toxikon/rostliny/silice.php>
- [14] ČAŇO, Lubomír. *Agropelety pro domovní kotle* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/66969/2017_BP_Cano_Lubomir_170226.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Martin Lisý.
- [15] Výroba pelet. *Avydon* [online]. 2015 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.avydon.cz/vyroba-pelet>
- [16] KŘEPELKA, Jiří. Přednost řepky. *Zemědělec* [online]. 2013 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.zemedelec.cz/prednost-repky-mnohostranne-vyuziti-2/>
- [17] *BioLib* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.biolib.cz/cz/main/>
- [18] *Fytomasa* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/database/Fytomasa.htm>
- [19] *Vlhkost, obsah popele a výhřevnost vzorku* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://svt.pi.gin.cz/vuztweb/doc/clanky/ekonomika/tab16.htm>
- [20] PETŘÍKOVÁ, Vlasta. Bioplyn z krmného šťovíku. *Tzbinfo* [online]. 2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/17804-bioplyn-z-krmneho-stoviku>
- [21] Jak funguje výroba energie z biomasy. *ČEZ* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa/flash-model-jak-funguje-vyroba-energie-z-biomasy.html>
- [22] Co jsou to emise. *Ekoporadny* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.ekoporadny.cz/faq/co-jsou-to-emise.htm>
- [23] KOLONIČNÝ, Jan. *Emise při spalování biomasy* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>
- [24] Informace o látkách ohlašovaných do IRZ. *IRZ* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/20>

- [25] ČSN EN 303-5: Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení. TZ: 075303. Praha, ČSN, 2013.
- [26] Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva. *Tbzinfo* [online]. Ostrava: Topinfo, 2014 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
- [27] Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva: Evropská komise [online]. 2015 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://publications.europa.eu/cs/publication-detail/-/publication/8809cda2-2f6e-11e5-9f85-01aa75ed71a1/language-cs>
- [28] ČSN EN 13240. Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů: Požadavky a zkušební metody. Praha: ÚNMZ, 2002.
- [29] Návod k obsluze a instalaci automatického kotle VERNER A251.1 [online]. 2001, , 46 [cit. 2019-05-02]. DOI: ČSN EN ISO 9001. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/data/sharedfiles/1717/a251-1-b022-66931-070708.pdf>
- [30] Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů. *Tzbinfo* [online]. 2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>
- [31] Phyllis2 – Database for biomass and waste [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.ecn.nl/phyllis2/>
- [32] WIWART, Marian, Mariusz BYTNER, Łukasz GRABAN, Waldemar LAJSZNER a Elżbieta SUCHOWILSKA. Spelt (*Triticum spelta*) and Emmer (*T. dicoccon*) Chaff Used as a Renewable Source of Energy. *BioResources* [online]. 2017, **12**(2), 3744-3750 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.15376/biores.12.2.3744-3750. ISSN 1930-2126. Dostupné z: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/11085>
- [33] Stanovení účinnosti kotlů. *Tzbinfo* [online]. 2014 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A^r	Obsah popeloviny	[%]
b	Obsah uhlíku obsaženého v tuhých zbytcích	[%]
c_m	Průměrná naměřená koncentrace škodlivin	[mg/m ³]
$c_{p_{sp}}, c_{p_{H_2O}}$	Střední měrná kapacita spalín a vody	[kJ.m ³ /K]
C_r	Podíl uhlíku v nespálených zbytcích	[%]
f	Koeficient vlhkosti	[-]
h	Prchavá hořlavina	[%]
i_{w1}, i_{w2}	Entalpie vody na vstupu a výstupu kotle	[kJ/kg]
M_i	Molární hmotnost jednotlivých látek	[kg/kmol]
m_{pal}	Hmotnostní tok paliva	[kg/s]
m_w	Hmotnostní tok vody	[kg/s]
O_2^m	Průměrná naměřená koncentrace kyslíku	[%]
O_2^r	Referenční obsah kyslíku	[%]
Q	Objem odebraného vzorku	[m ³]
Q_i^r	Výhřevnost paliva	[MJ/kg]
Q_s	Spalné teplo	[MJ/kg]
q_a	poměrná ztráta citelným teplem	[%]
q_b	poměrná ztráta chemickým nedopalem	[%]
q_r	poměrná ztráta mechanickým nedopalem	[%]
q_s	poměrná ztráta sáláním, konvekcí a kondukcí	[%]
r	Výparné teplo vody	[kJ/kg]
S	Dílčí plocha stěny kotle	[m ²]
t_i	teplota povrchu kotle	[°C]
t_o	Teplota okolí	[°C]
t_{sp}	Teplota spalín na výstupu z kotle	[°C]
V_i	Objem i-té složky ve spalínách	[m ³ /kg]
V_M	Molární objem	[m ³ /kmol]
V_{vz}, V_{sp}	Objem vzduchu a spalín	[m ³ /kg]
W	Vlhkost v palivu	[%]
λ	Součinitel přestupu tepla	[W/m ² .K]
α	Přebytek vzduchu	[-]
τ	Doba měření	[s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Závislost výhřevnosti biomasy na obsahu vody [4].....	17
Obr. 1.2 Vývoj hrubé výroby elektřiny [9]	20
Obr. 1.3 Vývoj dodávky tepla [9]	21
Obr. 2.1 Vertikální peletovací stroj [14].....	23
Obr. 2.2 Řepka olejná [17].....	24
Obr. 2.3 Pšenice [17].....	24
Obr. 2.4 Lnička setá [17].....	25
Obr. 2.5 Konopí seté [17].....	25
Obr. 2.6 Bojíněk luční [17].....	25
Obr. 2.7 Triticale [17].....	25
Obr. 2.8 Krmný šťovík [20].....	26
Obr. 2.9 Kukuřice [17].....	26
Obr. 4.1 Kotel Verner A251.1.....	34
Obr. 4.2 SIEMENS ULTRAMAT.....	35
Obr. 4.3 Závislost NO na čase.....	36
Obr. 4.4 Závislost CO na čase.....	37
Obr. 4.5 Měřicí soustava pro stanovení koncentrace TZL [30].....	38
Obr. 4.6 Odebrané vzorky TZL.....	39
Obr. 4.7 Graf závislosti součinitele přestupu tepla na teplotě povrchu kotle [33].....	43

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Chemické složení hořlaviny [3,4]	18
Tab. 1.2 Hrubá výroba elektřiny v ČR [9].....	20
Tab. 1.3 Dodávka tepla z biomasy v ČR [9].....	21
Tab. 3.1 Mezní hodnoty emisí dle normy ČSN EN 303-5 [25].....	29
Tab. 3.2 Hodnoty emisních limitů a účinností podle Směrnice o ekodesignu [26].....	29
Tab. 3.3 Provoz a prodej kotlů na tuhá paliva podle Směrnice o ekodesignu [26].....	30
Tab. 3.4 Požadavky na účinnost kotle při jmenovitém výkonu 25 kW [25].....	31
Tab. 4.1 Technické parametry kotle Verner A251.1 [29].....	34
Tab. 4.2 Přehled zkoušky plynných emisí.....	36
Tab. 4.3 Přehled zkoušky TZL.....	39
Tab. 4.4 Prvkový rozbor sena [31].....	39
Tab. 4.5 Hrubý rozbor sena.....	39
Tab. 4.6 Prvkový rozbor špaldy [32].....	39
Tab. 4.7 Hrubý rozbor špaldy.....	40
Tab. 4.8 Přehled vypočtených účinností kotle.....	43